

탄소섬유시트로 보강된 RC보의 해석 및 설계 프로그램 개발

Analysis and Design Program of RC Beams Strengthened with Carbon Fiber Sheets

김성도*
Kim, Seong-Do

김성수**
Kim, Sung-Soo

ABSTRACT

This study attempts to analyze the flexural behavior of RC beams strengthened with fiber sheets according to the KCI strength method and nonlinear flexural analysis. Also based on these methods, analysis and design programs are developed by the visual basic programming language.

Programs include the influence of concrete tensile capacity and failure strain of fiber sheets.

1. 서론

철근 콘크리트는 교량, 도로, 터널, 항만, 댐 등 토목 구조물 및 건축 구조물 건설에 매우 광범위하게 적용되고 있으며 인간이 영위하는 주거 및 기반시설 구축에 큰 영향을 주고있다. 그러나 철근 콘크리트 구조물은 건설당시의 시공적 요인, 시간의 경과에 따른 노후화, 사회적 환경의 변화, 부적절한 유지 관리 등으로 인하여 구조내력이 저하될 수 있으며, 이는 공용 중에 있는 구조물의 안전성에 많은 문제점을 일으키기도 한다. 여러 가지 원인들에 의해 내하력이 부족하게 된 구조물은 조속하게 보수, 보강되어야 하며, 이에 따라 내력 증진이 요구되는 철근 콘크리트 구조물들을 효과적으로 보강하는 방법들이 최근 많이 개발되고 있다. 그 중 섬유시트를 부착하는 보강공법이 시공의 간편성이나 역학적 및 내구성에 대해 많은 장점을 가지고 있는 것으로 인정받고 있다. 그러나 섬유시트로 보강한 철근콘크리트 보(이하 "보강보")의 휨거동을 살펴보면 섬유시트는 재료 물성시험에 의한 순수 인장 파단변형률에 도달하기 전에 대부분 파괴하거나 모체로부터 탈락하는 경향을 보였으며 이는 섬유시트의 순수인장 파단변형률을 보강보 휨해석에 그대로 적용할 수 없으며 보강보의 최대 내력을 산정할 때는 섬유시트의 변형률을 적절하게 평가할 필요가 있음을 의미하며, 이 값이 보강보의 휨거동 해석 및 설계에 큰 영향을 미침을 보고하였다(김성도 외, 2003). 또한 인장 철근비나 섬유계수를 달리한 탄소섬유시트로 보강된 철근콘크리트 보 실험중에서는 측정된 콘크리트 압축변형률이 극한변형률(0.003)보다 작은 값임에도 불구하고 보강보 실험에서 측정된 최대휨모멘트가 강도설계법으로 산정된 공칭 휨모멘트보다 큰 것으로 나타나, 인장축에 부착된 탄소섬유시트에 의해 구속된 인장축 콘크리트가 외부하중에 저항하는 힘이 있는 것으로 보고하였다(심중성 외, 1997, Hollaway 외, 1999). 이런 점을 감안할 때, 콘크리트 인장성능을 고려하지 않거나 섬유시트에 대해 적절히 평가된 파단변형률을 적용하지 못하는 강도설계법으로 보강보를 해석하고 설계하는 것은 한계가 있을 수 있다.

본 연구는 보강보의 파괴형태, 응력분포, 보강재의 파단변형률, 콘크리트 인장성능 등을

* 경성대학교 교수, 정회원

** 경성대학교 석사과정, 비회원

고려한 보강보 휨해석(비선형해석)기법을 이용하여(정진환 외, 2003) 탄소섬유시트로 보강된 철근콘크리트 보의 해석 및 설계 프로그램을 개발하고 또한 강도설계법을 이용한 철근콘크리트 보의 휨 해석 및 설계 프로그램도 포함하여 비선형 해석과 강도설계법에 의한 데이터를 비교할수 있도록 함으로서 현장 실무 기술자가 현장 조건을 고려하여 보강보의 설계 및 해석을 쉽고 편리하게 적용할 수 있도록 하였다.

2. 보강보 휨 해석

2.1 강도설계법

강도설계법에 의한 탄소섬유시트 보강보의 공칭휨모멘트 M_n 의 산정을 위한 변형률 분포도와 응력 분포도를 그림 1에 나타내었다. 탄소섬유시트 변형률 ϵ_f 를 변형률 적합조건을 이용하여 $\epsilon_{cu}(=0.003)$ 에 관하여 나타내면, 다음과 같다.

$$\epsilon_f = \left(\frac{h-c}{c} \right) \epsilon_{cu} \quad (1)$$

단면 내 압축력과 인장력에 대해 힘의 평형조건식을 적용하여 중립축거리 c 에 대해 정리하면, 다음과 같다.

$$0.85\beta_1 f_{ck} b c^2 + (A_f E_f \epsilon_{cu} - A_s f_y) c - A_f E_f \epsilon_{cu} h = 0 \quad (2)$$

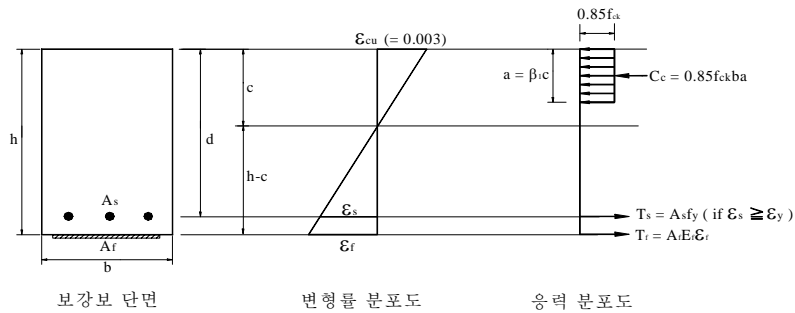


그림 1. 강도설계법에 의한 탄소섬유시트 보강보의 공칭휨모멘트 산정을 위한 변형률 분포도와 응력 분포도

(2)식으로 중립축 위치 c 를 구할수 있다면 강도설계법에 의한 탄소섬유시트 보강보의 M_n 은 다음과 같이 산정된다.

$$M_n = T_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + T_f \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (3)$$

여기서 $T_s(=A_s f_y)$ 는 인장철근의 인장력, $T_f(=A_f E_f \epsilon_f)$ 는 탄소섬유시트의 인장력이다.

2.1.1 강도설계법 프로그램

강도설계법에 의한 탄소섬유시트 보강보의 공칭휨모멘트는 식(2)에 의해 중립축 위치를 구하고 이를 식(3)에 대입하여 간단하게 구할 수 있다. 본 과제에서는 이를 프로그래밍 언어 비주얼 베이직을 통해 프로그램화하였으며, 공칭휨모멘트 산정에 대한 프로그램 해석 및 설계 화면은 각각 그림 2와 그림 3과 같다. 그림 4는 강도설계법에 의한 보강재의 설계 흐름도를 나타나고 있다.

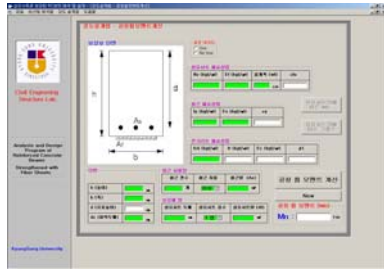


그림 2. 강도설계법 해석 화면

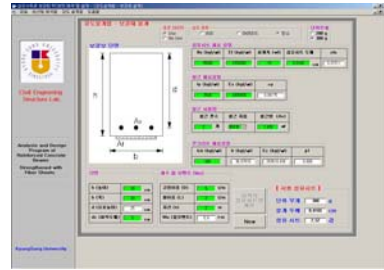


그림 3. 강도설계법 설계 화면

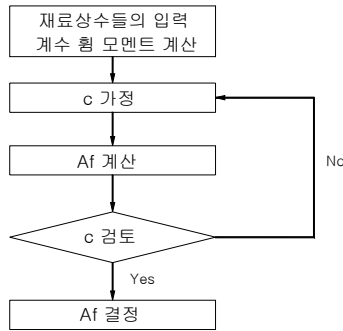


그림 4. 강도설계법에 의한 보강재 설계의 흐름도

2.2 비선형 해석법

강도설계법과는 다르게 비선형 해석법은 응력분포, 보강재의 과단변형률, 콘크리트 인장성능 등을 고려하였으며 힘의 평형조건과 변형률 적합조건을 만족시켜야 하며 섬유시트와 콘크리트 인장면 사이의 부착은 완전하다고 가정한다. 부착을 위해 사용된 접착제의 거동은 무시하며, 철근의 지름과 섬유시트의 두께는 보의 깊이와 비교할 때 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에 철근과 섬유시트 단면에서의 응력들은 각 재료 도심축의 응력과 같은 크기의 응력이 작용한다고 본다. 또한, 섬유시트는 보의 하부에만 위치하는 것으로 가정하여 계산한다. 비선형 해석법에 의한 탄소섬유시트 보강보의 공칭휨모멘트 M_n 의 산정을 위한 변형률 분포도와 응력 분포도를 그림 5에 나타내었다

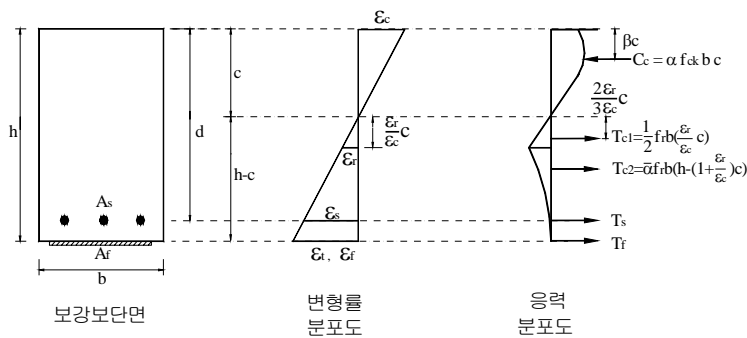


그림 5. 비선형 해석법에 의한 탄소섬유시트 보강보의 공칭휨모멘트 산정을 위한 변형률 분포와 응력 분포도

콘크리트 압축응력 $f_c(\epsilon)$ 는 다음과 같이 변형률의 함수로 주어지는 Shah(1983) 모델식을 적용하였다.

$$f_c(\epsilon) = \begin{cases} f_{ck} \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^A \right] & : \epsilon \leq \epsilon_0 \\ f_{ck} \exp[-k(\epsilon - \epsilon_0)^{1.15}] & : \epsilon > \epsilon_0 \end{cases} \quad (4)$$

여기서, ϵ_0 는 콘크리트 압축강도 f_{ck} 에 대응하는 변형률을, $A(=E_c \epsilon_0 / f_{ck})$ 와 $k(=2.43 f_{ck})$ 는 각각 실험상수를, 그리고, E_c 는 콘크리트의 탄성계수를 의미한다.

한편, 콘크리트 인장성능에 대해서는, 단면내 인장변형률을 인장파괴변형률(ϵ_r)과 비교하여 ϵ_r 보다 작은 영역에서는 선형 응력 분포를 큰 영역에서는 비선형 응력 분포를 가정한 다음과 같은 제안식을 사용하였다(Gopalaratnam(1985)).

$$f_t = \begin{cases} E_c \epsilon_t & : \epsilon \leq \epsilon_r \\ f_r (e^{-x\omega\lambda}) & : \epsilon > \epsilon_r \end{cases} \quad (5)$$

여기서, E_c 는 압축탄성계수와 같은 값을 가진다고 가정하였으며, $\lambda(=1.01)$ 와 $x(=0.608 \times 10^{-3})$ 는 실험상수, ω 는 균열폭(단위: μcm)이다. 그리고 콘크리트 휨인장강도(파괴계수 : f_r)는 $\epsilon = \epsilon_r$ 일 때의 응력 값이다.

따라서 그림5를 참고한 보강보의 공칭휨모멘트 M_n 은 다음과 같이 주어진다.

$$M_n = T_{cl} \left(1 - \beta + \frac{2\epsilon_r}{3\epsilon_c} \right) c + T_{c2} \left[\left(1 - \beta + \frac{\epsilon_r}{\epsilon_c} \right) c + \beta \left\{ h - \left(1 + \frac{\epsilon_r}{\epsilon_c} \right) c \right\} \right] + T_s (d - \beta c) + T_r (h - \beta c) \quad (6)$$

2.2.1 비선형 해석 프로그램

비선형 휨해석법에 의한 탄소섬유시트 보강보의 공칭휨모멘트는 강도설계법보다 조금 더 복잡하게 전개된다. 모든 값들은 증분값으로 주어지는 콘크리트 압축변형률에 대해 계산되며, 보강보의 설계 흐름도를 그림 8에 도시하였다. 이를 비주얼 베이직을 통해 프로그램화하였으며, 공칭휨모멘트 산정에 대한 프로그램 해석 및 설계 화면은 각각 다음 그림 6, 그림 7과 같다.

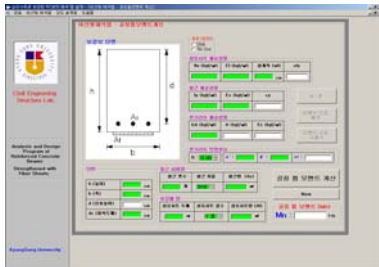


그림 6. 비선형 해석법 해석 화면

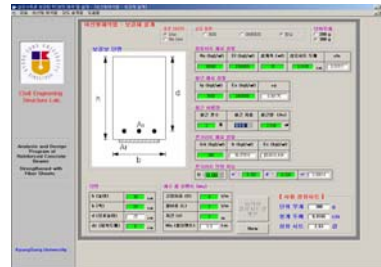


그림 7. 비선형 해석 설계 화면

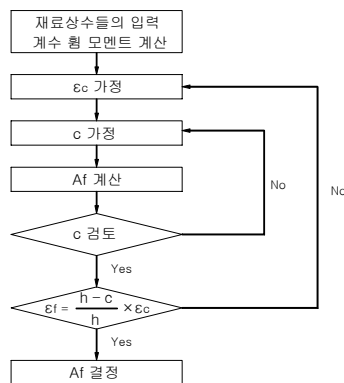


그림 8. 비선형 해석법에 의한 보강재 설계 흐름도

3. 결론

본 연구는 타당성이 입증된 비선형 해석 기법과, 섬유 적층수에 따른 파단 변형률 감소 경향을 감안하여 탄소섬유시트로 보강된 철근콘크리트 보의 해석 및 설계 프로그램을 개발하였다. 정당한 보강 보 해석 및 합리적인 설계를 위해 적절한 계수가 도입된 탄소 섬유시트 파단변형률(1겹에서는 75%, 2겹에서는 65%, 3겹에서는 60%, 4겹에서는 55%를 사용)을 적용하였으며 표 1은 보강보의 공칭 휨 모멘트에 대한 실험값(정진환 외, 2003)과 본 프로그램의 계산값을 비교한 것으로 실험값과 계산값의 차이가 거의 없음을 확인할 수 있다.

또한 본 프로그램의 설계 부분은 설계 실무에 종사하는 기술자에게 번거롭고 불필요한 반복작업을 감소시켜 시간과 노력을 절감함으로써 설계의 효율성을 높일수 있을 것으로 판단된다.

표 1. 탄소섬유시트 보강보의 실험값과 프로그램의 계산값 비교

주철근	보강 겹수	실험에 의한 공칭 휨 모멘트 값 $M_n(t \cdot m)$	프로그램에 의한 공칭 휨 모멘트 값 $M_n(t \cdot m)$	
			비선형해석법	강도설계법
D13	1	4.68	4.72	5.10
	2	5.39	5.99	6.51
	3	6.56	7.13	7.52
	4	8.35	8.01	8.33
D16	1	5.68	5.80	5.71
	2	6.84	7.04	7.01
	3	8.15	8.12	7.96
	4	9.08	8.97	8.73
D19	1	7.36	7.55	6.94
	2	8.38	8.69	8.02
	3	-	9.63	8.85
	4	10.20	10.37	9.53

참고문헌

1. 김성도, 황태일 (2003), "R,C.보에 부착된 섬유시트의 파단변형률 평가에 관한 실험적 연구", 한국구조물진단학회, 제7권 3호
2. 조백순, 정진환, 김성도, 박대효, 이우철 (2002), "강도설계법으로 산정된 탄소섬유시트 보강 철근 콘크리트 보의 공칭 휨모멘트", 한국콘크리트학회, 제4권 2호, pp.593~598
3. Gopalaratnam, V. S. and Shah, S. P. (1985) "Softening Response of Plain Concrete in Direct Tension", ACI Journal, Vol. 82, No. 3, pp.310~323
4. Hollaway, L. C. and Mays, G. C. (1999) "Strengthening of Reinforced Concrete Structures", Edited by Hollaway, L. C. and Leeming M. B., CRC Press, pp.327
5. Shah, S. P. and Fafitis, A., and Arnold, R. (1983) "Cyclic Loading of Spirally Reinforced Concrete", Journal of Structural Engineering, Vol. 109, No. 7, pp1695~1710
6. 정진환, 김성도, 조백순, 이우철 (2003), "탄소섬유시트로 보강된 RC 보의 공칭휨모멘트 - II.해석적 연구", 대한토목학회논문집, 제23권 제5A호, pp.931~938